Modélisation numérique et analyse de comportement d'un écran de soutènement autostable

Chogueur Aissa[(1)] **; Zadjaoui Abdeldjalil**[(1)]

(1) Faculté de Technologie, Université de Tlemcen
Bp 230 rue Abi Ayad, 13000 Algérie
e-mail : most_chog@yahoo.fr

RÉSUMÉ. *L'objet du présent travail porte sur la modélisation numérique et l'analyse du comportement d'un écran de soutènement autostable du type paroi moulée en béton armé, fiché dans le sable par la méthode du coefficient de réaction à l'aide du logiciel K-Réa – Terrasol et par la méthode numérique aux éléments finis en utilisant le logiciel Plaxis 2D. Les différentes simulations effectuées considérent que le sol soutenu est non chargé en analysant l'influence de principaux facteurs tels que le module de Young, la cohésion, l'angle de frottement interne du sol et le phasage des travaux.*

Cependant, l'analyse des résultats se focalise sur la déformée de la paroi, les moments fléchissants, les déplacements horizontaux. Ainsi, ces résultats obtenus, comparés entre eux mêmes seront confrontés à d'autres résultats expérimentaux [GAU 02]. Par conséquent ,une très bonne cohérence entre les résultats numériques et expérimentaux a été constatée.

ABSTRACT. *The object of this work concerns numerical modeling and analyzes behavior of a self-stabilizing retaining wall stuck in sand by subgrade reaction method of the using software K-Réa–Terrasol and by the numerical method with the finite elements by using the software Plaxis2D v8. The different simulations carried out consider that the supported ground is uncharged by analyzing the influence of main factors such as the Young modulus, the cohesion, angle of internal friction of soil and the phasage of excavation work.*

However, the analysis of the results is focused on the deformation of the wall, the bending moments, horizontal displacements. The results are compared and confronted with experimental results [GAU 02]. Consequently, a very good coherence between the numerical and experimental results was noted.

MOTS-CLÉS: *Soutènement auto stable, Coefficient de réaction, éléments finis, Interface, paroi moulée, modélisation numérique.*

KEY WORDS: *Self-stabilizing retaining wall, subgrade reaction, finite elements, Interface, diaphragm wall, numerical modeling.*

1. Introduction

Les méthodes de dimensionnement des écrans de soutènement reposent actuellement sur diverses règles de calcul. Si les méthodes classiques dites à la rupture, à la ligne élastique et la poutre équivalente sont encore employées pour certains types d'ouvrages, c'est principalement la méthode du coefficient de réaction et les méthodes numériques qui sont les plus fréquemment retenues. La méthode du coefficient de réaction est assez bien maîtrisée et les seules incertitudes résident dans le choix du coefficient de réaction [Del 01], [Mon 94]. Les méthodes numériques présentent l'avantage de prendre en compte de manière plus précise le comportement du sol et de l'interface sol-paroi et aussi de pouvoir considérer de multiples conditions hydrauliques ainsi que différentes options quant à la modélisation du soutènement. Toutefois, les résultats obtenus par ces méthodes nécessitent encore d'être validés par d'autres résultats expérimentaux aux laboratoires (centrifugeuse par exemple) ou mesurés en place.

L'objet du présent travail porte sur la modélisation numérique et l'analyse du comportement d'un écran de soutènement autostable du type paroi moulée en béton armé, fiché dans le sable (Fontainebleau) par la méthode du coefficient de réaction à l'aide du logiciel K-Réa –Terrasol et par la méthode numérique aux éléments finis en utilisant le logiciel Plaxis 2D-v8.5. Pour les deux méthodes, on procède aux différentes simulations et ce, lorsque l'écran est fiché dans le sol soutenu non chargé.

Pour la première méthode , on s'intéresse à analyser l'influence de principaux facteurs pouvant affecter les mouvements du sol et la non-stabilité de l'écran de soutènement. Ces facteurs concernent essentiellement le module de Young, la cohésion et l'angle de frottement interne du sol et le phasage des travaux.

Concernant la méthode des éléments finis, le sol est homogène et sec, son comportement est décrit par une loi élastoplastique du type Mohr Coulomb avec deux valeurs différentes de cohésion du sol c et un même angle de frottement interne φ, la paroi moulée est modélisée par élément « poutre ». Les simulations sont à exécuter avec des maillages différents et des coefficients réducteurs de l'interface (sol-paroi) pris variables.

Pour les deux méthodes, l'analyse des résultats se focalise sur la déformée de la paroi, les moments fléchissants, les déplacements horizontaux et les pressions des terres. Ainsi, ces résultats obtenus, comparés entre eux mêmes seront confrontés à d'autres résultats expérimentaux [Gau 02].

2. Méthode du coefficent de réaction

Une étude numérique par la méthode du coefficient de réaction a été menée par le biais du logiciel K-Réa pour modélisation et analyse du comportement de l'écran autostable. Le calcul est basé sur la détermination des coefficients de poussée et de butée. Bien-entendu la littérature évoque trois principales méthodes de calcul de ces coefficients, il s'agit de la méthode Coulomb, Rankine et des tables de Caquot-Kerisel et Absi. Le calcul de coefficient de réaction pourra être effectué par les trois méthodes à savoir la méthode de Balay, de Schmitt et suivant les abaques de Chadeisson. Pour faire un choix adéquat, une étude numérique préliménaire a été effectuée. Les résultats retenus sont ceux qui sont en cohérence avec les travaux expérimentaux [Gau 02].

2.1 Paramètres initiaux du calcul

Les paramètres initiaux de lancement des calculs aux coefficients de réaction sont ceux du sable de Fontainebleau [Gau 02]. Il s'agit d'un sable fin, siliceux et propre ayant les caractéristiques suivantes :

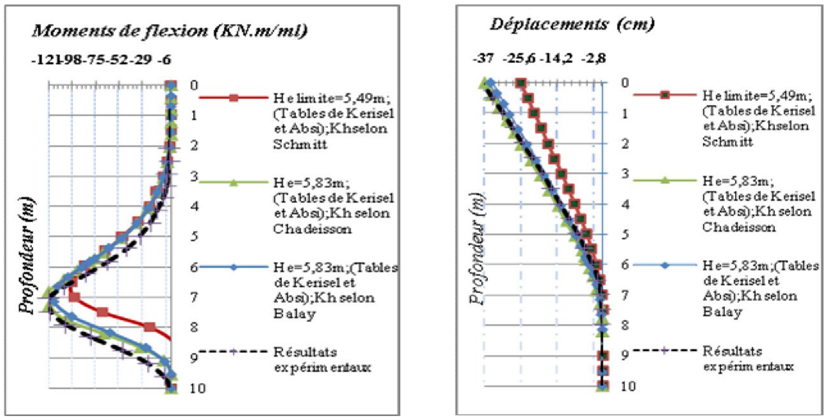
γ(kN/m^3) = 16 ; c (kPa) = 2,60 ; φ(°) = 39,40 et E_M (MPa) = 27,10.

2.2 Paramètres de la paroi moulée

L'écran de type paroi moulée est d'une épaisseur équivalente de 0,152 m et de hauteur de 10 m avec un module de Young de béton qui vaut 22350 MPa, est utilisé dans cette étude.

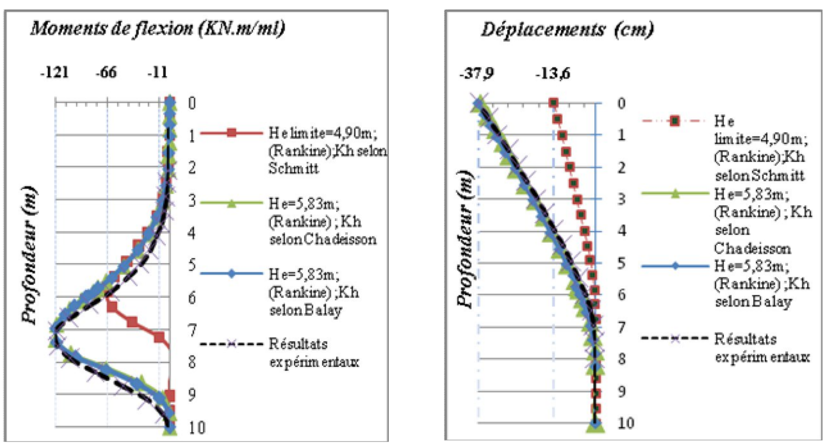
2.3 Résultats et interprétations

Les résultats de calculs des différentes simulations effectuées par les trois méthodes de calcul des coefficients de poussée et de butée et les autres trois méthodes de calcul de coefficient de réaction sont présentés sur les figures 1, 2 et 3 suivantes:



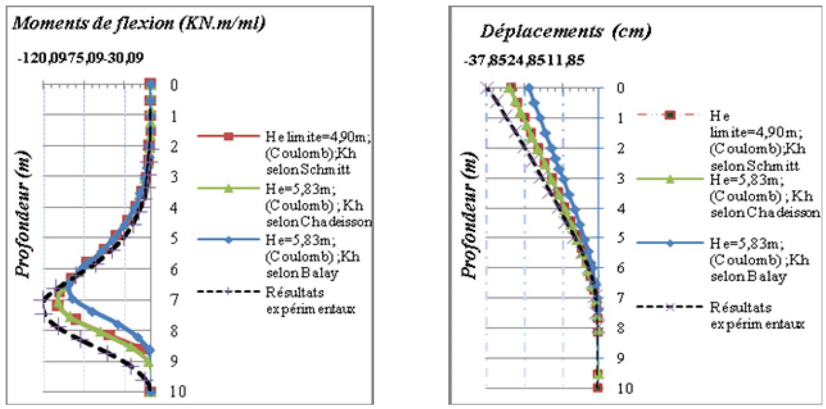
a)-Profils des moments de flexion *b)-Profils de déplacements horizontaux*

Figure 1. *Profils des moments de flexion et de déplacements horizontaux de la paroi relatifs à la hauteur d'excavation He=5,83m calculée en fonction de K_h par les 03 méthodes (Balay-Schmitt et Chadeisson)-avec tables de Kerisel et Absi.*



a)-Profils des moments de flexion *b)-Profils des déplacements horizontaux*

Figure 2. *Profils des moments de flexion et de déplacements horizontaux de la paroi relatifs à la hauteur d'excavation He=5,83m calculée en fonction de K_h par les 03 méthodes (Balay-Schmitt et Chadeisson)- Avec méthode de Rankine.*



a)-Profils des moments de flexion *b)-Profils des déplacements horizontaux*

Figure 3. *Profils des moments de flexion et des déplacements horizontaux de la paroi n°01 relatifs à la hauteur d'excavation He=5,83 m calculée en fonction de K_h par les 03 méthodes (Balay-Schmitt et Chadeisson)- Avec méthode de coulomb.*

Ainsi, ces mêmes résultats obtenus par ces méthode sont regroupés dans le tableau 1.

Il apparaît que le calcul du coefficient de réaction par les *abaques de chadeisson* en utilisant les deux méthodes de calcul des coefficients de poussée et de butée qui sont la méthode de Rankine et par les tables de Kerisel, a donné des résultats proches de ceux obtenus expérimentalement par l'essai noté A0-1 [Gau 02].

Le moment maximal estimé à 121kN.m/ml, est également conforme au résultat expérimental avec une légère différence pour le déplacement maximal estimé à 37cm et 37,10cm plus proche de 37,85 cm obtenu expérimentalement.

Aussi, la formule de *Balay* en utilisant la méthode de Rankine, a permis de satisfaire un seul résultat également conforme aux résultats expérimenetaux et que le moment maximal a été estimé de 121kN.m/ml, de même les déplacements maximaux ont été estimés d'une valeur de 37,90cm très proche de 37,85cm.

La formule de *Schmitt* a fortement sous-estimé les résultats pour les trois méthodes, ceci est dû au coefficient de réaction plus élevé quant les deux autres méthodes donnent des coefficients de réaction K_h rapprochés donnés respctivement comme suivant :

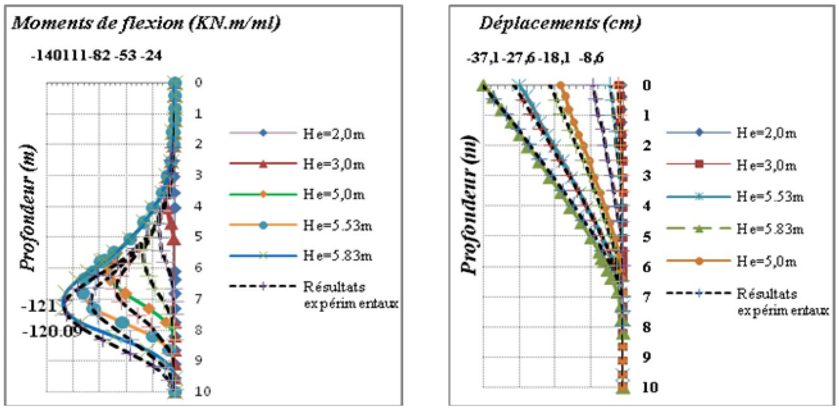
K_h Schmitt (400821) > K_h Chadeisson (58411) > K_h Balay (52238).

Tableau 1. *Comparaison des résultats par formule de caclul de coefficient de réaction et par méthodes de calcul des coefficients de poussée et de butée.*

	Formule de Balay			Formule de Schmitt			***Abaque de chadeisson***		
	Coulomb	**Rankine**	Tables de Kerisel et Absi	Coulomb	Rankine	Tables de Kerisel et Absi	Coulomb	**Rankine**	**Tables de Kerisel et Absi**
Hauteur d'excavation limite (m)	6 ,55	6,55	6,64	5,83	4,90	5,49	5,83	6,39	6,39
Hauteur d'excavation de référence (m)	5,83	5,83	5,83	5,83	5,83	5,83	5,83	5,83	5,83
Moments de flexion maximaux (kN.m/ml)	92,50	**121**	116	103	66,10	98,20	104	**121**	**121**
Déplacements maximaux (cm)	23,40	**37,90**	34.90	29.50	13,60	25,60	29,90	**37,10**	**37**

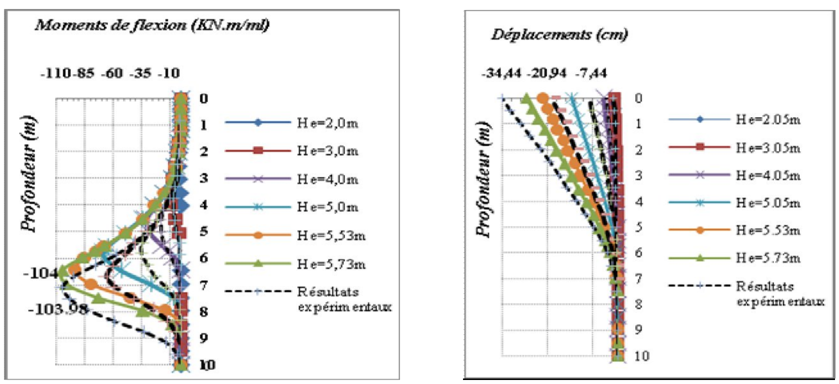
2.4 Mise en évidence des résultats expérimentaux

Pour le reste des calculs, on opte pour la première combinaison en utilisant les abaques de chadeisson et les 03 méthodes afin de mettre en évidence les réultats expérimentaux. Les simulations ainsi effectuées visent à vérifier la convergence des calculs au cours de l'excavation par phase jusqu'à atteindre les hauteurs expérimentales de référence 5,73m ;5,83m et 5,95m correspondantes aux essais expérimentaux notés respectivement A0-1, A0-2 et A1-1 [Gau 02]. On présente ici seuls les résultats obtenus par combinaison de la méthode de Rankine avec les abaques de Chadeisson [KRE 06] et qui concernent les deux hauteurs de réference 5,73m et 5,83m comme il est illustré suivant les figures 4 et 5 ci-dessous.



a)-Profils des moments de flexion *b)-Profils des déplacements horizontaux*

Figure 4. *Profils des moments de flexion dans la paroi- (K_a et K_p calculés par la méthode de Rankine et K_h par la méthode de Chadeisson)-He=*5,83 *m.*



a)-Profils des moments de flexion *b)-Profils des déplacements horizontaux*

Figure 5. *Profils des moments de flexion dans la paroi - (K_a et K_p par méthode de Kérisel et Absi et K_h par la méthode de Chadeisson)- He=*5,73 *m*

2.5 Interprétation et commentaires

Les résultats concernant un écran avec un sol soutenu non chargé, sont les suivants:

❖ Le comportement de l'écran est correctement retranscrit et il est globalement en cohérence avec les constations expériementales.

❖ Les valeurs de moments de flexion maximaux sont comparables aux résultats expérimentaux. Nous assistons à une sous estimation de ces moments pour les hauteurs inférieure à 5m.

❖ En ce qui concerne les déplacements maximaux la différence est enregistrée uniquement pour les hauteurs d'excavation de 5,73 m et 5,95 m. Il a été constaté une sous-estimation par rapport à l'expérimentation, soit une diminution de 20% et 33% respectivement pour les deux hauteurs. Les inclinomètres pour les mêmes hauteurs ont enregistrés respectivement 34 cm et 50 cm.

En conclusion, la méthode de calcul de coefficient de réaction bien qu'elle soit beaucoup plus utilisée, retranscrit globalement le comportement de l'écran via les profils de moments de flexion et de déplacements horizontaux analogues à ceux obtenus expérimentalement et elle estime par ailleurs les hauteurs d'excavation expérimentales, elle semble limitée pour estimer correctement les déplacements latéraux.

3. Modélisation numérique de l'écran autostable par la méthode des éléments finis

La modélisation numérique du sol et l'écran de soutènement est effectuée en utilisant le logiciel *Plaxis2D-V8.5*. Les dimensions géometriques optées pour les calculs sont celles conseillées pour la modélisation d'une excavation non soutenue en déformation plane, avec les grandeurs maximales [WIL 08a], le sol est modélisé par la loi de comportement de *Mohr-Coulomb*, la paroi moulée de hauteur de 10 m est modélisée par l'élément « *poutre* ». On a utilisé quatre types de maillage pour s'assurer de la reproductibulité et de la convergence des résultats. Les conditions aux limites appliqueés sont gérées automatiquement selon l'option par défaut. Les calculs sont exécutés par phase d'excavation pour une hauteur de 1 m sauf pour les deux et/où les trois dernières phases selon le cas simulé. Cette hauteur est fixée selon la convergence des calculs ou selon la hauteur d'excavation souhaitée.

Il est à noter que deux valeurs distinctes de la cohésion du sol c (0 kPa et 2,30 kPa) ont été considérées dans les simulations conditionnées par le coefficient réducteur d'interaction sol-structure R_{inter} et prenant pour valeurs respectivement 0,80 ; 0,88 et 1,0.

3.1 Données de propriétés du sol

Le sol est constitué d'une seule couche de sable de Fontainebleau, le modèle de comportement est celui de Mhor Coulomb. Les paramètres E_{ref} , c_{ref} , ψ et R_{inter} sont variables selon le cas simulé comme il est indiqué dans le tableau suivant :

Tableau 2. *Propriétés des couches de sols et des interfaces*

E_{ref} (MPa)	ν	c_{ref} (kPa)	φ (°)	Ψ (°)	R_{inter}
10 ou 75	0,275	0 ou 2,60	39,40	16,70	0,80 ou 0,88 ou 1,00

3.2 Propriétés de la paroi moulée

Les propriétés de la paroi moulée en béton armé sont comme suivant :
$E_{béton}$ (MPa) = 22350 ; d (m) = 0,152 ; ν = 0,30 ; h (m) = 10

3.3 Différents types de maillage utilisés

Le logiciel Plaxis2D v8.5 permet à l'utilisateur de choisir le maillage via le menu arborescent, il peut être un maillage individuel ou combiné. Pour notre cas, nous avons opté pour les maillages détaillés suivant le tableau 3.

Tableau 3. *Type de maillage opté pour les calculs.*

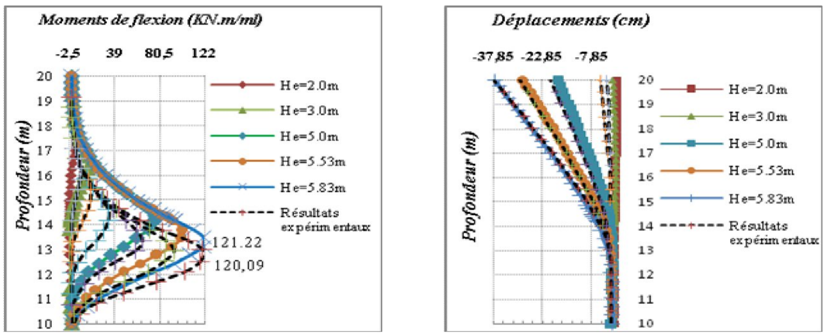
Ordre	Type de maillage	Nbre d'éléments	Nbre de noeuds
Maillage01	Coarse	233	2019
Maillage02	Medium	383	3255
Maillage03	Fine	699	5835
Maillage04	Dense	2920	23933

Tableau 4. *Comparaison des résultats de simulations numériques*

	R_{inter}	Type de maillage	Mf max (kN.m/ml)	Calcul / Expér (%)	U max (cm)	Calcul / Expér (%)
	Résultats expér		120,09		37,85	
E=10MPa et c_{ref} =0,00kPa	1	Coarse	112,8	-6,1%	34,11	-9,9
		Medium	115,54	-3,8%	33,73	-10,9
		Fine	117,90	-1,8%	33,95	-10,3
		Dense	**120,8**	0,6%	35,81	-5,4
	0,8	Fine	**121,98**	1,6%	40,59	7,2
	0,88	Coarse	**119,22**	-0,7%	**38,7**	2,2
		Medium	**121,22**	0,9%	**37,8**	-0,1
		Fine	117,80	-1,9%	33,95	-10,3
		Dense	124,44	3,6%	38,92	2,8
E=10MPa et c_{ref} =2,60kPa	1	Coarse	58,54	-51,3%	11,02	-70,9
		Medium	60,34	-49,8%	11,34	-70,0
	0,88	Medium	62,88	-47,6%	15,28	-59,6
		Fine	65,50	-45,5%	15,28	-59,6
E =75MPa et c_{ref} =2,60kPa	1	Coarse	58,60	-51,2%	11	-70,9
	0,88	Medium	60,34	-49,8%	11,36	-70,0
		Fine	65,50	-45,5%	15,28	-59,6

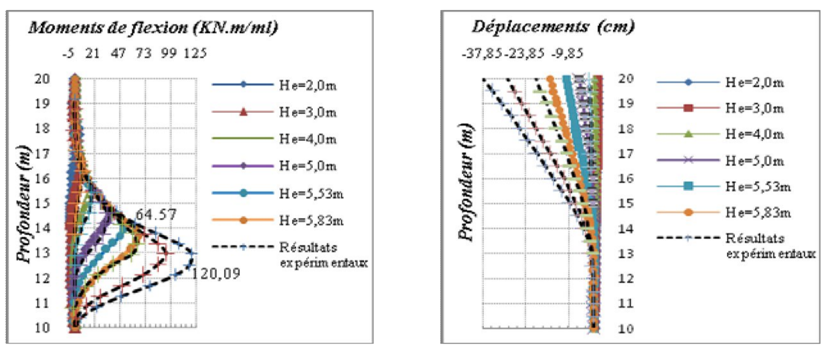
3.4 Calculs et résultats

Les simultions effectuées visent à vérifier la convergence des calculs au cours de l'excavation par phase jusqu'à atteindre la hauteurs expérimentale de référence 5,83 m dont les résultats sont présentés dans le tableau 4.



a)-Profils des moments de flexion *b)-Profils de déplacements horizontaux*

Figure 6. *Evolution de moments de flexion avec He=*5,83 *m - Modèle Mohr Coulomb, E=10MPa, c =0,0kPa-* R_{int}*=0,88 - Loi non associée - Maillage medium.*



a)-Profils des moments de flexion *b)-Profils de déplacements horizontaux*

Figure 7. *Evolution de moments de flexion avec He=*5,83 *m -Modèle Mohr Coulomb, E=10MPa, c =2,60kPa -* R_{int}*=0 ,88 - Loi non associée- Maillage fine.*

3.5 Interprétation et commentaires

❖ Le comportement de l'écran est correctement retranscrit et il est globalement conforme à celui montré par les essais expérimentaux (profils des moments de flexion et de déplacements horizontaux).

❖ L'encastrement réel est convenablement représenté sur la figure relative aux profils de déplacements en tête qui illustrent clairement la hauteur de fiche

d'encastrement située entre les cotes de 10 et 14m soit une fiche de 4 m, la déformée ne concerne que la partie au dessus du fond de la fouille .

a/- Pour une cohésion nulle :

❖ Pour un contact souple (R_{inter}=1), les valeurs des moments de flexion maximaux sont sous estimés dans les cas des maillages coarse, medium et fine. Dans les trois situations la différences ne dépasse pas -6%. Par contre, dans le cas d'un maillage dense, une légère sur-estimation a été enregistrée (1% environ). **Cependant, dans le cas d'un** contact glissant (R_{inter} < 1), il semble selon les valeurs obtenues que le type de maillage a peu d'influence sur les résultats et que le coefficient réducteur de l'interaction influe directement sur le comportement de l'écran de soutènement.

❖ Les valeurs de déplacements horizontaux maximaux calculés différent de -11% à 7% par rapport au résultat expérimental. Pour un contact souple, les déplacements sont sous estimés de -11% à -6%, sans influence du type de maillage utilisé. Par contre, dans le cas d'un contact glissant, on constate aussi une autre fois que le type de maillage a peu d'influence sur les résultats et que le coefficient réducteur de l'interaction influe sur les résultats.

b/-Pour une cohésion du sol c = 2,60 kPa

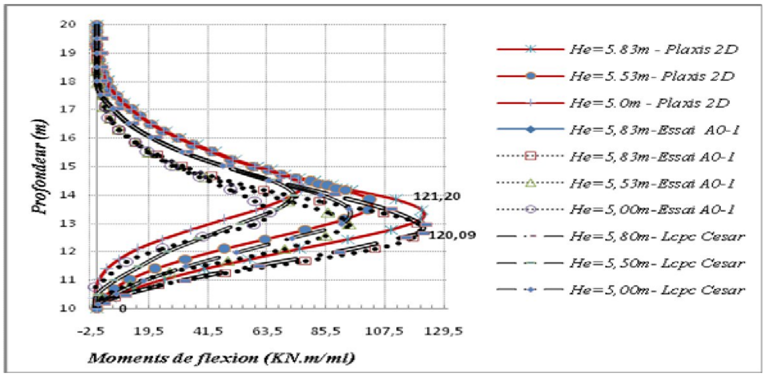
❖ Les valeurs de moments de flexion maximaux sont incluses dans un intervalle de (-51% à -45%) de la valeur expérimentale. Plus le maillage est dense plus le taux de sous-estimation des résultats diminue. Le module de Young et le coefficient réducteur de l'interaction ont peu d'influence sur les résultats de calculs.

❖ Les valeurs de déplacements horizontaux maximaux calculés sont incluses dans un intervalle de -71% à -60% du résultat expérimental. De même, plus le maillage est dense plus le taux de sous-estimation des résultats diminue. Le module de Young et le coefficient réducteur de l'interaction n'affecte pas le calcul.

En conclusion, pour une cohésion nulle du sol, lorsque le contact est glissant, les cacluls sont satisfaisants et au moins deux résultats sont conformes aux mesures expérimentaux. Cependant, lorsque la cohésion du sol c =2,60kPa les résultats sont fortement sous-estimés quelque soit le type de contact.

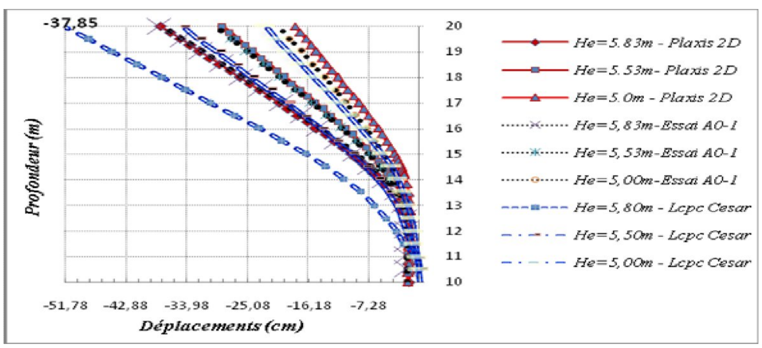
4. Confrontation de résultats expérimentaux avec les calculs numériques

La confrontation des résultats numériques aux résultats expérimentaux nous a permis de comparer les performances de chacune des deux méthodes et de préciser leurs limites. Pour se faire, les différents profils de moments de flexion et de déplacements maximaux résultants des deux méthodes sont regroupés et présentés sur les Figures 8 et suivantes:



a)-Evolution des moments de flexion

Figure 8. *Evolution de moments de flexion avec He=*5,83 *m - Modèle Mohr Coulomb, E =10MPa, c=0kPa,* R_{int}*=0,88 - Loi non associée- Maillage medium.*



b)-Evolution des déplacements horizontaux

Figure 9. *Evolution de moments de flexion avec He=*5,83 *m – Modèle Mohr Coulomb, E =10MPa, c=0,kPa,* R_{int}*=0,88 - Loi non associée- Maillage medium.*

5. Conclusion

Il ressort de cette étude comparative les conslusions suivantes :

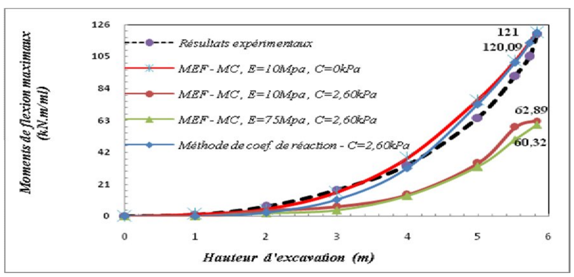
❖ A n'importe quelle phase d'exacavation, il a été constaté une très bonne cohérence entre les valeurs calculées et les valeurs enregistrées sur place, Cette constation est valable pour le comportement de soutènement, des déplacements et des moments félchissants en tête. Néanmoins, pour les hauteurs d'excavation maximales une légère surestimation a été notée par rapport aux mesures effectuées.

❖ A propos de cas d'un écran avec sol soutenu non chargé, les méthodes utilisées pour l'estimation des hauteurs d'excavation de référence 5,73 m et 5,83 m

coïncident parfaitement avec les résultats expérimentaux. Cependant, elles sous-estiment les résultats de moments de flexion surtout dans les quatre premières phases et elles les surestiment au delà de cette phase. En revanche, il a été constaté que les déplacements horizontaux sont sous-estimés pour toutes les phases d'excavation à l'exception de la dernière phase.

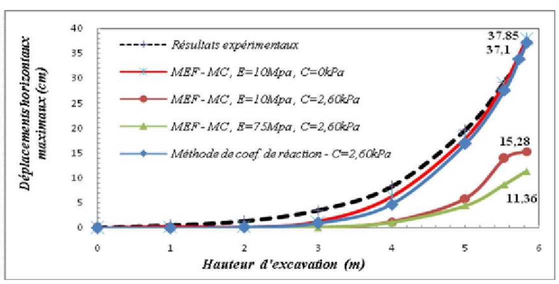
❖ Pour les quatre premières phases, la solution numérique par la méthode des éléments finis coïncide parfaitement avec les mesures effectuées en place mais uniquement pour une cohésion nulle. De même pour la méthode de calcul aux coefficients de réaction une très bonne cohérence a été constatée mais dans le cas d'une cohésion non nulle soit c=2,60kPa. Malheureusement il n'ya pas d'explication de ce paradoxe entre les deux méthodes.

❖ La méthode des éléments finis avec un module de Young E =75MPa et une cohésion c = 2,60kPa a sous-estimé fortement les résultats obtenus quant la méthode aux coefficients de réaction n'a pas parvenu à satisfaire les calculs avec une cohésion nulle.



a)-Moments de flexion

Figure 10. *Comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes avec les résultats expérimentaux.*



b)-Déplacements horizontaux

Figure 11. *Comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes avec les résultats expérimentaux.*

6. Références bibliographiques

[MON 94] MONNET A., *Module de réaction, coefficient de décompression, au sujet des paramètres utilisés dans la méthode de calcul élasto-plastique des soutènements, 1994*, Revue française de Géotechnique N° 67-1er trimestre.

[GAU 02] GAUDIN CHRISTOPHE., Modélisation physique et numérique d'un écran de soutènement autostable, application à l'étude de l'interaction écran-fondation - Thèse de doctorat ,2002 , Ecole centrale de Nantes, France**.**

[DEL 01] DELATTRE LUC., *Un siècle de méthodes de calcul d'écrans de soutènement: I. L'approche par le calcul – les méthodes classiques et la méthode au coefficient de réaction*, Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées n°234, 2001, pp.35-55.

[HOR 10] HORATIU POPA., LORETTA BATALI., *Using Finite Element Method in geotechnical design, Soil constitutive laws and calibration of the parameters. Retaining wall case study-Technical University of Civil Engineering of Bucharest*, Romania, July 2010.

[KRE 06] K-REA TERRASOL., Manuel d'utilisation 2004, Edition 2006.

[PLA 08] PLAXIS2D., Manuel de référence , Version8.

[OLI 01] OLIVIER COMBARIEU., YVES CANÉPA., *l'essai cyclique au pressiomètre*, Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, 2001, Réf.4381-PP.37-65.

[MES 97] MESTAT PHILIPPE., *Maillage d'éléments finis pour les ouvrages de géotechnique ,conseils et recommandations,* Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, Décembre 1997.

[WIL 08a] WILLIAM CHEANG.**,** *Aknowldgement,Part1 :Geometry space, boundaries and meshing –Part2 : Initial stresses and Phi-c reduction,* 2008*,* Plaxis seminar-Vietnam.

[WIL 08b] WILLIAM CHEANG.**,** *Plaxis element code for Soil and Rock nalyses, modelling of excavation using plaxis,* 2008, Plaxis seminar-Vietnam.